

〈論 文〉

微小疲勞龜裂의 檢出과 停留龜裂

李 宗 炯*

(1989年 10月 30日 接受)

Detection and Non-Propagating Cracks of Small Fatigue Crack

Jong Hyung Lee

Key Words : Small Crack(미소균열), Smooth Specimen(평활재), Pre-Cracked Specimen(예균열재), Carbon Steel(탄소강), Crack Detection(균열검출), Non-Propagating Crack(정류균열), Stress Ratio(응력비), Fatigue Limit(피로한도), Threshold(하한계)

Abstract

Detection and non-propagating cracks of small fatigue crack for smooth and pre-cracked specimens were examined in a carbon steel. The fretting oxide induced crack closure triggered by the roughness induced crack closure has an important role in determining the length. The fatigue limit for the with no cracks or with a short pre-crack is lower at $R=-1$ than that at $R=0$. A non-propagating crack are quite different between points near the specimen's surface and those of deepest penetration.

1. 서 론

피로파괴 과정은 균열의 발생·성장 및 최종파괴의 3개의 단계이다. 파괴역학의 입장에서 결함평가를 목적으로해서 피로균열성장속도와 응력확대계수의 관계를 결정하는 연구에서는 비교적 큰균열(large crack)이 대상으로 되어왔다. 그러나, 피로파괴 과정에서 중요한 것은 미소균열(small crack)의 발생과 성장이다.

Fig. 1과 같이 미소균열은 큰 균열보다 균열성장속도가 빠르기 때문에 큰 균열의 균열성장법칙에 따르지 않는다⁽¹⁾는 보고도 있다. 즉, 큰균열의 성장법칙을 근거로 한 허용결함 치수의 판정 및 잔존수명의 산출이 위험측으로 되는 것을 의미하고 있고, 공학적으로 중요한 의미를 갖고 있다. 강의 피로

한도의 특성과 그것에 관련한 미소피로균열의 발생·진전 및 정류의 특성에 대해서는 많은 연구가 행해지고 있다⁽²⁾. 비교적 측정이 용이한 노치재(notch specimen)에 대해서는 미소균열의 진전특성을 밝히고 있지만⁽³⁾, 평활재(smooth specimen)에 대해서는 미소균열의 검출, 측정등의 어려움으로 문제가 많다. 특히 정류균열의 생성기구의 해명은 오래전부터의 과제이다⁽⁴⁾. 최근, 이 문제에 관해서는 균열닫힘(crack closure)의 중요성이 인식되고 있다^(4~6). 본 연구에서는 미소균열의 정의로서 균열의 크기가 재료의 조직의 크기와 order적으로 같은 균열의 특성이라는 것과 균열의 크기가 소성역 크기와 order적으로 같은 균열의 특성에 착안해서 탄소강 평활재와 예균열재(pre-cracked specimen)에 대해서 응력비 $R=-1$ 및 $R=0$ 의 피로한도 특성과 평활재의 미소균열의 검출 및 정류균열의 생성기구를 균열 열림 닫힘에 주목해서 검토하였다.

*정회원, 금오공과대학 생산기계공학과

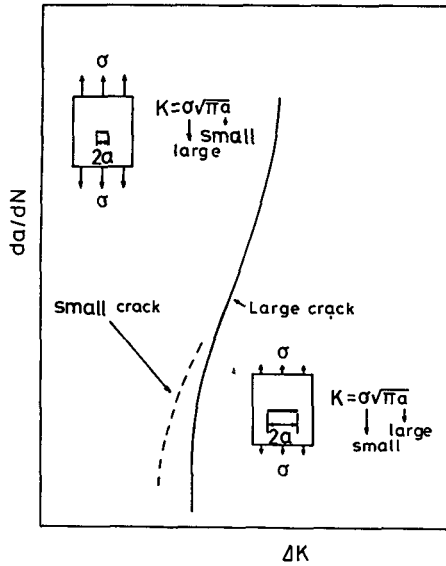


Fig. 1 Relation between crack growth rate and stress intensity factor of small fatigue crack

2. 재료 및 실험, 측정 방법

2.1 재료 및 시험편의 형상

실험에 사용한 재료는 배관용 탄소강 SPPS 42이다. 화학 성분을 Table 1에, 기계적 성질을 Table 2에 나타낸다. 평균결정입경은 약 10 μ m이다. 시험편은 모래시계형(hourglass type)로서, Fig. 2에 형상과 크기를 나타낸다. 기계가공 한 후에 砂紙(emery paper)로서 연마하고, 더우기 diamond paste로서 경면 연마한 다음 실험에 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of material

C	Si	Mn	P	S
0.19	0.26	1.40	0.026	0.013

Table 2 Mechanical properties

Upper yield point	Lower yield point	Tensile strength	Elongation	Reduction in area
σ_{su}	σ_{sl}	σ_B	δ	ψ
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)
385	362	592	34.3	67.4

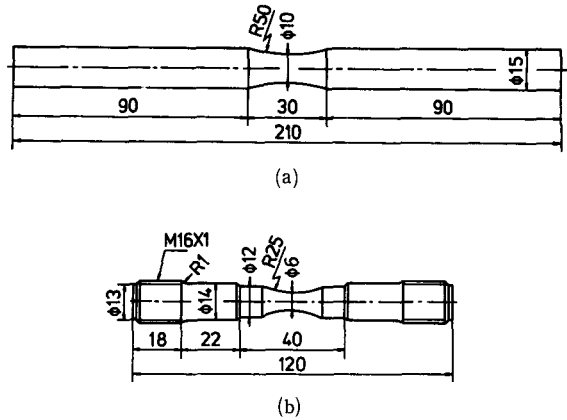


Fig. 2 Specimen geometry : (a) $R=-1$, (b) $R=0$

2.2 실험방법

피로시험은 $R=-1$ 의 경우는 용량 98N·m의 小野(one's)식 회전 굽힘 피로시험기(반복속도 ; 47.5 Hz)를 사용하고 $R=0$ 의 경우는 용량 ± 19.6 KN의 전기유압서보 피로시험기(반복속도 ; 30Hz)를 사용, 하중제어 피로시험을 행하였다. 피로한도는 Staircase법에 준해서 결정하였다.

2.3 미소균열의 검출 및 균열 열림 단합의 측정

미소균열길이 및 균열 열림 단합의 측정에 대해서는 시험편 표면에서 소정의 반복수마다 채취한 replica에 chrome, carbon을 진공증착해서 금속현미경 및 투과전자현미경(T.E.M)에서 관찰하였다. 또, 파단하지 않은 시험편에 대해서는 정류균열의 깊이 방향의 형상 및 균열면의 양상을 조사하기 위해 액체 질소분위기, 즉 시험편을 액체질소속에 넣어서 약 1분간 유지시킨후 취성파단시켜서 균열면을 노출한 후에 주사전자현미경(S.E.M)을 사용해서 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로한도 및 정류균열

Fig. 3에 최대응력 σ 와 파단회전수 N 의 관계를 나타낸다. Fig. 3의 $\sigma-N$ 곡선에서 평활재 $R=0$ 경우의 경사부의 회기 직선의 식은 다음과 같다.

$$\log N = \bar{\alpha}_1 + \bar{\beta}_1 \sigma = 9.313 - 0.0115\sigma \quad (1)$$

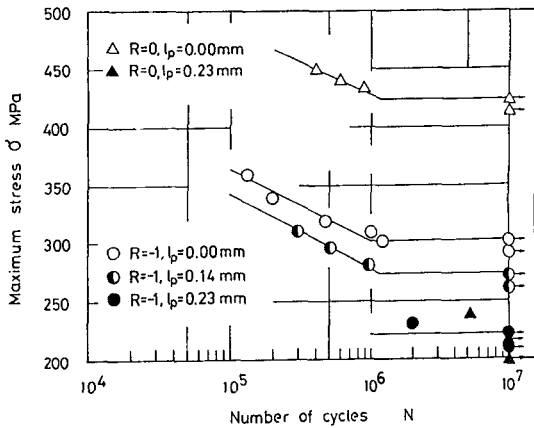


Fig. 3 σ-N curves

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^3 (\log Ni - \overline{\log N})}{\sum_{i=1}^3 (\sigma - \bar{\sigma})^2}$$

$$\bar{\alpha}_1 = \overline{\log N} - \beta_1 \bar{\sigma}$$

파단수명의 대수의 표본표준편차는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}(\log N) = \left[\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \left\{ \log Ni - (\bar{\alpha}_1 + \beta_1 \sigma)^2 \right\}^2 \right]^{1/2} = 0.05 \quad (2)$$

피로한도의 표본표준편차는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}(s) = (1/\beta_1) \bar{\sigma}(\log N) = 0.4 \text{ kg/mm} \quad (3)$$

수평부 피로한도($\bar{\sigma}_{w0}$)는 Staircase법에 준해서 식(4)에 의해서 결정하였다.

$$\bar{\sigma}_{w0} = \{\sigma(2) + \sigma(3) + \dots + \sigma(n+1)\} / n = 307 \text{ MPa} \quad (4)$$

예균열 시험편은 평활시험편의 피로한도 값보다 높은 응력 $\sigma = 1.05 \bar{\sigma}_{w0}$ 에서 균열길이 0.14mm, 0.23mm가 되도록 예균열(l_p)을 도입하였다. $R=0$ 및 $R=-1$ 의 평활재 및 예균열재에 대한 $\sigma-N$ 곡선을 Fig. 3에 표시한다. 각각의 피로한도는 상기의 평활시험편에 대한 똑같은 방법에 의해서 Fig. 3에 표시하였다. 피로한도(σ_w)근방의 응력에서 반복수가 10⁷회까지 도달해도 파단하지 않는 시험편에 대해서 정류균열(l_{npc})이 관찰되었다. 평활 시험편의 경우 피로한도에 가장 가까운 응력에서 파단하지 않았던 시험편에 대해서 관찰영역 $R=-1$ 의 경우는 62.8mm²($\pi D l = \pi \times 10 \times 2$), $R=0$ 의 경우는 56.5mm²($\pi \times 6 \times 3$)에서 정류균열을 측정하였다. 정류균열은 1단계의 미끄럼대 균열로 해서 펄라이트 결정립에 발생, 진전해서 결정입계에서

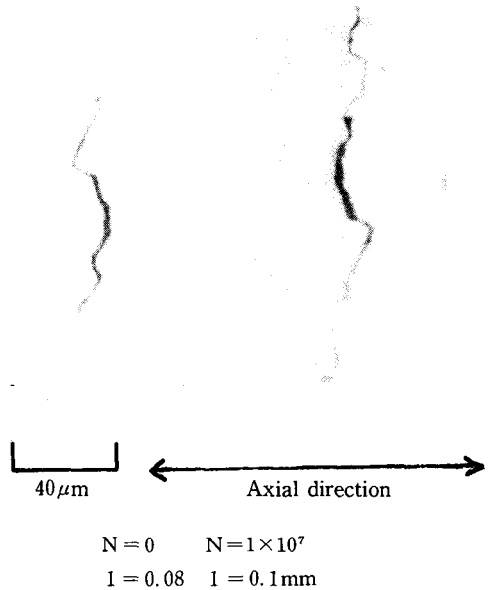


Fig. 4 Non-propagating crack of pre-cracked specimen ($R=0, \sigma_w=362 \text{ MPa}$)

저지되고 있다. 한편, 예균열시험편의 경우도 피로한도 근방의 응력에서 반복수가 10⁷회에 다달아도 파단하지 않는 시험편에 대해서 정류균열이 관찰되었다.

σ_w 에 가장 가까운 응력에서 파단하지 않았던 시험편에 대해서 정류균열에 이르는 과정을 레프리카로서 측정하였다. (예균열재의 정류균열에 대한 예를 Fig. 4에 나타낸다) 균열길이 l 과 반복수 N 의 관계를 Fig. 5에 나타낸다. $R=-1$ 의 경우는 $N \geq 10^6$ 회에서 급격히, $R=0$ 의 경우는 $N \geq 2 \times 10^6$ 회에서 서서히 정류에 이르고 있다. 이 반복수의 값은 Fig. 3에 나타낸 예균열의 $S-N$ 곡선의 꺾여지는 점의 위치에 대응하고 있다. 평활시험편을 포함해서⁽²⁾ $\bar{\sigma}-N$ 곡선의 꺾여지는 점의 위치에서 균열은 정류에 다다른다고 생각되어진다.

$R=-1, R=0$ 의 어느것의 경우도 예균열길이 l_p 의 증대에 따라 σ_w 는 저하하고 있다. 단, $R=0$ 의 경우는 $R=-1$ 의 경우와 비교해서, l_p 의 증대에 따라 σ_w 의 저하가 현저하고, $l_p=0.23 \text{ mm}$ 에서는 $R=0$ 와 $R=-1$ 의 경우의 σ_w 가 일치하고 있다. 즉, 최대응력으로서 표시하면 평활재, 미소균열재

의 피로한도는 $R=-1$ 의 경우가 $R=0$ 의 경우보다 낮지만, 큰 균열재의 피로한도는 양자의 경우라도 다르지 않다는 것을 알 수 있다. 평활시험편, 예균열시험편 어느것의 경우도 정류균열의 생성기구로서는 균열단힘이 중요하다.

균열단힘을 유기하는 인자로서는 소성 stretch, 파면거칠기, fretting 산화물이 생각되어진다⁽⁷⁾. 예균열시험편의 경우, 예균열도입의 응력과 시험응력 (σ_w 에 가장 가까운 응력)의 차가 큰 만큼 소성유기균열단힘의 기여는 크고, l_{nc} 는 크게 된다고 생각되어진다. 이것은 과대응력에 의한 균열진전의 지연의 현상과 같다.

한편, 균열은 미끄럼대 균열의 제 1 단계, 균열행로가 조직민감인 제 2a단계, 조직 불민감인 제 2b 단계로 해서 순차진전한다⁽⁷⁾. 균열행로의 결과인 파면거칠기는 제 1 단계에서 적고, 제 2a단계에서는 크고, 제 2b단계에서는 재차 적게된다⁽⁷⁾. 따라서, 본 실험의 경우, $l_p=0.14\text{mm}$ 의 균열은 제2a 단계이고, 파면거칠기 유기균열단힘의 기여가 균열진전에 따라 서서히 생기고, l_{nc} 는 크게 된다고 생각된다. 더욱이 파면거칠기 유기균열단힘을 원인으로 해서 국소적인 fretting 산화물 유기균열단힘이 균열진전에 따라 서서히 생긴다. 평활시험편의 경

우도 정류균열의 생성기구는 같다고 생각되어진다. 실험적으로는 확인되지 않았을지라도 정류균열은 예균열시험편의 경우와 같이, 예균열의 역할을 받는 제 1 단계의 미끄럼대 균열과 정류에 이르는 제 2a단계의 균열로 나누어 생각할 수 있다.

이 경우 소성유기균열단힘의 기여는 없다. 따라서, 파면거칠기 유기균열단힘과 fretting 산화물 유기균열단힘이 지배적 인자라고 판단된다.

3.2 정류균열의 Fractography

최대응력 σ_{max} 및 최소응력 σ_{min} ($R=-1; \sigma_{max} = -\sigma_{min}, R=0; \sigma_{min}=0$)때의 예균열 시험편의 정류균열의 열림단힘을 레프리카로서 관찰하였다. Fig. 6에 최대, 최소응력때의 균열열림변위 δ 를 측정 한 결과를 나타낸다. 최대, 최소응력때의 정류균

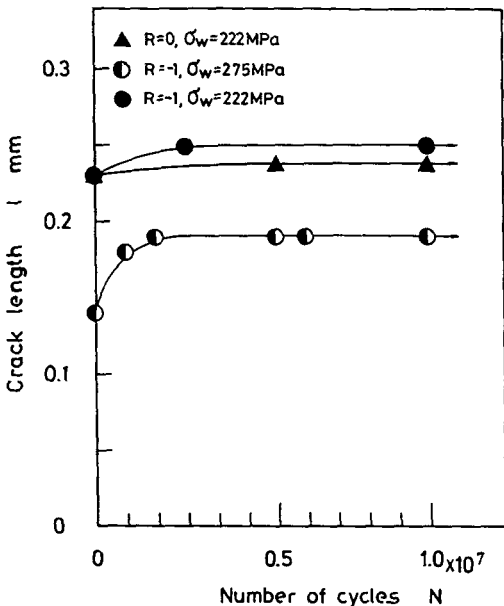


Fig. 5 Relation between crack length and number of cycles

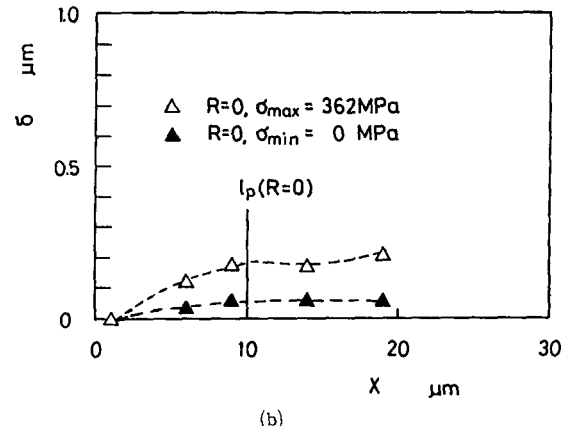
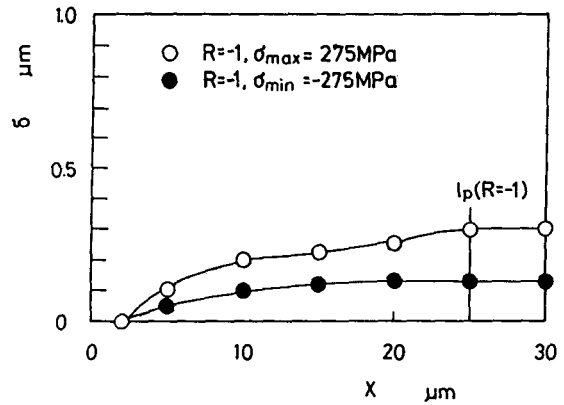


Fig. 6 Relation between crack closure displacement (δ) and position (x) ; (a) $R=-1$, (b) $R=0$

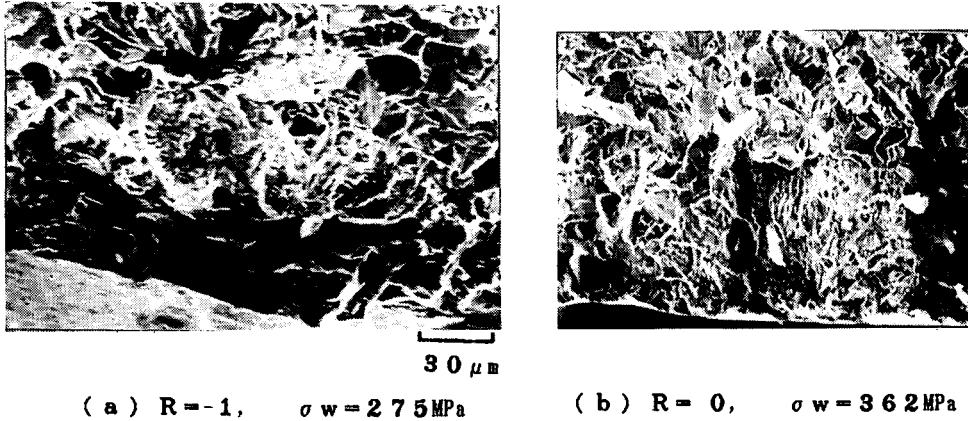


Fig. 7 Fractography of non-propagating crack

열선단은 거의 단혀있고, 수 μm 후방에서는 확실히 열림이 인정된다. 또, 최대응력때의 δ 는 정류균열 선단에서 예균열을 도입한 예균열길이 l_p 방향인 거리 x 의 증가에 따라 증대하지만 최소응력때의 δ 는 정류균열선단을 제외하고 거의 일정치를 나타낸다. 더우기 $R=-1$ 의 경우가 $R=0$ 의 경우보다도 σ_{max} 는 낮음에도 불구하고 어느것의 δ 도 크다. 관통균열의 경우 δ 는 최대응력으로서 결정되고, $R=-1$ 과 $R=0$ 의 경우로서 차이는 일어나지 않는다. 따라서, 상기는 미소균열의 특성이고 $R=-1$ 의 경우의 응력변동의 압축측에서의 변형이 δ 에 기여하는 것을 나타내고 있다. 그 결과 평활재, 미소균열재의 피로한도는 전술한 바와 같이 $R=-1$ 의 경우가 $R=0$ 의 경우보다 낮게 된다고 생각 되어진다. 단, 최대응력때의 δ 와 차, 즉 δ 의 변동범위 $\Delta\delta$ 는 응력비에 관계없이 거의 일정하다. 따라서, $\Delta\delta$ 가 직접적으로 균열의 진전, 정류를 지배하고 있다고 판단된다. 상기의 결과에서 정류균열의 생성기구는 예균열로부터 균열진전에 따라 파면거칠기를 원인으로 해서 균열선단 후방의 국소적인 위치에서 fretting 산화물이 생성된다. 그 결과 최소응력때의 균열선단 근방에 있어서 δ 는 증대하기 계속하고 드디어 최대응력때의 δ 에 일치하고 균열은 정류에 이른다.

예균열시험편에 대한 정류균열의 대표적인 fractography를 Fig. 7에 나타낸다. 관찰 결과 정류균열 영역은 검게 착색되어 파면접촉의 형적이 현저히 인정되어 정류균열 영역이 명료하게 식별되었다.

3.3 피로한도와 균열길이의 관계

평활시험편의 피로한도 σ_{w0} 와 정류균열길이 $l = l_{npc}$ 및 예균열시험편의 피로 한도 σ_w 와 균열길이 $l = l_p + l_{npc}$ 의 관계를 Fig. 8에 나타낸다. 전술한대로 $l(l_p)$ 의 증대에 따라 σ_w 는 저하한다. 그러나, l 의 적은 범위에 있어서, $R=-1$ 의 경우가 $R=0$ 의 경우보다도, σ_{w0} , σ_w 은 낮고, l 의 증대에 따라 저하는 완만하다. 그리고, l 의 증대에 따라 양자의 차이는 소멸된다. 평활재의 피로한도에 미치는 응력비의 영향을 생각하면, 당연하다고 말할 수 있지만, 이와같은 미소균열의 특성에 미치는 응력비의 영향은 주목할 가치가 있다. 피로파면의 형상으로부터 정류에 다다른 균열을 편평한 반타원 상포면 균열로 본다. 이 경우 최심부의 응력확대계수 범위 ΔK 는 다음 식으로 근사된다.

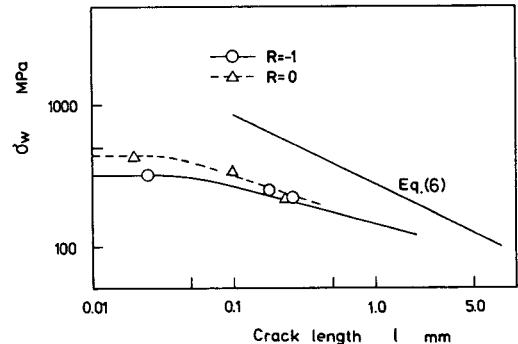


Fig. 8 Relation between fatigue limit and crack length

$$(1.12/\Phi) \sigma \sqrt{\pi a} = \Delta K_{th} \quad (5)$$

여기에서 σ 는 최대응력, a 는 균열길이, Φ 는 a/l 의 함수이다. $a/l=1/3$ 로 하면⁽⁸⁾ $\Phi=1.32$ 이다. 한편, 관통균열에 대한 하한계 응력확대계수 범위는 $\Delta K_{th}=8.0\text{MPa}\sqrt{m}$ 이다.

따라서, 미소표면균열의 ΔK_{th} 가 관통균열의 ΔK_{th} 와 같다고 하면 다음식이 성립한다.

$$\sigma_w^2 l = 84.93 (\text{MPa}\sqrt{m})^2 \quad (6)$$

평활시험편, 예균열시험편의 결과는 식 (6)의 관계의 하측에 위치하고 있고 l 의 감소에 따라 차이가 크게된다. 즉 예균열시험편의 결과는 다음식으로도 표시된다.

$$\sigma_w^m l = c \quad (7)$$

단, m 및 c 는 정수는 아니다. m 은 l 의 감소에 따라 증대하고, 또 응력비의 영향이 생기게 된다. 이상의 결과는 미소표면균열의 특성으로 해서 종래부터 알려지고 있는 것이다. 금후의 비교적 큰 표면균열에 대한 ΔK_{th} 를 조사하여 같은 비교를 행함과 동시에 응력비의 영향에 관련해서 표면 및 내부에 있어서 균열열립단힘의 측정을 행할 필요가 있다고 생각되어진다.

3.4 피로균열 성장속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)의 관계

평활시험편에 대해서 σ_{w0} 이상의 응력 $\sigma=322\text{MPa}$ 에서 미소균열로부터 큰 균열에 이르는 균열길이 l 과 반복수 N 의 관계를 레프리카로서 측정하였다. $a/l=1/3$ 을 가정해서, 균열진전속도 da/dN 과 식 (5)의 응력확대계수범위 ΔK 의 관계를 Fig. 9에 나타낸다.

평활재의 $da/dN-\Delta K$ 관계는 ΔK 의 감소에 따라 관통균열의 결과보다도 가속측으로 벗어나는 것이된다. 이것은 Fig. 8의 결과와 같은 경향이다. 그러나, 평활시험편의 $da/dN-\Delta K$ 관계는 관통균열의 $da/dN-\Delta K_{eff}$ 관계를 상회하는 것이 아니고 오히려 이것에 가깝다.

즉, 미소표면균열의 진전특성은, 균열단힘을 유기하는 인자가 아니고, 균열이 응력변동의 인장측에서 거의 열려 있는 것으로 생각된다. 평활시험편, 예균열시험편의 피로한도와 균열길이 l 로부터 식 (5)에 있어서 $a/l=1/3$ 을 가정해서 외관상의 하한계응력 확대계수범위 ΔK_{th} 로해서 $da/dN=10^{-10}\text{m/cycle}$ 의 선상에 표시한 결과를 Fig. 9에 나

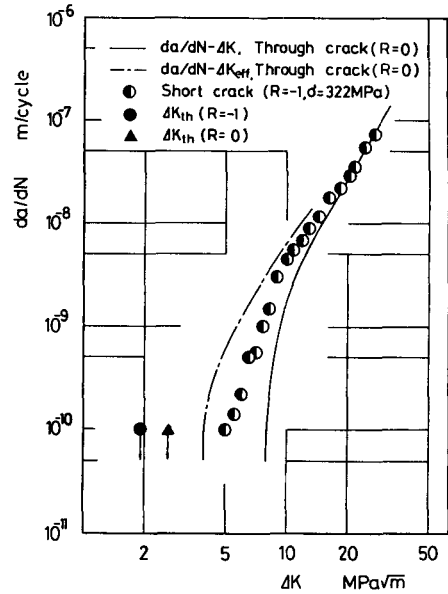


Fig. 9 Relation between crack propagation rate and stress intensity factor

타낸다. 미소균열의 정류의 원인은 균열단힘이고 ΔK_{th} 을 유효응력 확대계수범위 ΔK_{eff} 로 표시하면 거의 0에 가깝다고 생각된다. 그러나, 상기의 ΔK_{th} 조차도 상술한 미소표면균열의 진전특성, 혹은 $da/dN-\Delta K_{eff}$ 관계보다도 더욱이 가속측에 위치한다.

금후 이 불연속의 원인을 규명할 필요가 있다.

4. 결 론

탄소강에 대해서 미소피로균열의 검출과정과 피로한도의 특성 및 정류균열의 생성기구를 검토한 결과는 다음과 같다.

(1) 정류균열 길이의 응력비, 예균열 길이 의존성 및 정류균열 열립단힘의 실측결과로부터 정류균열의 지배인자는 파면거칠기를 원인으로 하는 fretting 산화물 유기균열 단힘이라고 판단된다.

(2) 미소균열재의 피로한도는 응력비의 영향을 받지만 큰 균열재의 경우는 받지 않는다.

(3) 미소균열재의 피로한도는 관통균열의 하한계 응력확대계수 값보다 낮다.

(4) 정류균열의 표면과 내부의 차이가 인정되는 것에 대한 해명은 금후의 과제이다.

후 기

본 연구는 1988년도 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 동재단 관계자 여러분께 감사함을 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Taylor, D. and Knott, J.F. 1981, "Fatigue Crack Propagation Behaviour of Short Cracks", *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 4, No. 2, pp. 147~155.
- (2) 中澤一, 小林英男, 森田明弘, 飯倉省一, 宮内和人, 石井良男, 1974, "結晶粒の大きさを變えた低炭素鋼平滑および切欠き材の疲れき裂の舉動と疲れ限度", *日本機械學會論文集*, 第 40 卷, 第 329號, pp. 9~22.
- (3) 李宗炯, 1987, "Notch材의 微小균열 및 成長特性", *大韓機械學會 秋季學術大會 抄錄集*, pp. 33~36.
- (4) 西欲弘信, 高尾健一, 1976, "き裂閉口現象と疲勞き裂傳ば舉動に及ぼす平均應力の影響", *日本機械學會論文集* 第 42卷, 第 365號, pp. 1964~1974.
- (5) 田村 優, 山田邦博, 清水 眞佐男, 國尾 武, 1983, "パーライト・フェライト鋼の耐久限度と停留き裂舉動について", *日本機械學會論文集*, 第 49 卷, 第 447 號, pp. 1378~1387.
- (6) 小林英男, 山本 普, 中澤一, 1969, "切欠き材の疲れき裂と累積疲れ被害", *日本機械學會論文集*, 第 35 號, 第 274 號, pp. 1199~1206.
- (7) 小林英男, 1983, "疲勞き裂進展特性とき裂閉口", *日本機械學會論文集*, 第 49 卷, 第 443 號, pp. 771~778.
- (8) HideoKobayashi, Yukio Kawada and Hajime Nakazawa, 1976, "A Fractographic Study of Stage 1 Cracking with Particular Reference to Endurance Limit", *Journal of the Society of Materials Science Japan*, Vol. 25, No. 276, pp. 881~887.